

地層処分と地質環境の長期安定性： 地震・断層活動に伴う地下水流動系の変化に関する検討事例

丹羽正和*1

地震や火山活動といった地殻変動が活発な日本列島では、これら地殻変動によって生じる地質環境の長期的な変化を適切に予測・評価することが、地層処分の信頼性向上にとって必要不可欠となる。地震を引き起こす断層については、その活動性評価に加え、周辺岩盤中の地下水流動を把握する観点からも重要な調査対象となる。本稿では、地質環境の長期的な変化について評価した研究事例として、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地下水圧変化の観測データに基づき、地震に伴い断層の透水性が変化したかどうかを検討した内容について報告する。

Keywords: 地層処分, 地震, 断層, 地下水圧

Appropriate estimation and safety assessment for long-term changes in geological environment are essential to an improvement of reliability for geological disposal. Specifically, study on faults is important for understanding regional groundwater flow as well as an assessment as a trigger of future earthquakes. Here, possibility of changes in permeability of faulted materials induced by earthquakes was examined based on monitoring data of groundwater pressure before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

Keywords: geological disposal, earthquake, fault, groundwater pressure

1 はじめに

プレートの収束帯に位置している日本列島は、安定大陸に比べて地殻変動が活発で、地震や火山活動などが多い地域である。このため日本における地層処分の安全確保としてはとくに、地層処分システムに期待される物理的な隔離機能がこれらの地殻変動によって著しく損なわれる可能性を予測・評価するとともに、地殻変動によって生じる地質環境（例えば、熱特性、水理特性、力学特性、地球化学特性）の長期的な変化を予測・評価し、処分施設の最適な設計・施工などに反映していくことが必要となる。日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では1988年より、これらの予測・評価に係る研究開発（地質環境の長期安定性に関する研究）を行ってきた。

原子力機構における研究開発では、活断層や地下のマグマ・高温流体の分布や隆起量の推定、古気候の復元などに関する調査技術の開発を進めるとともに[1]、地質環境の長期的な変化の予測に資するため、地殻変動の将来にわたる一様継続性に関する検討などを行ってきた（地殻変動の一様継続性に関する検討例については、過去のバックエンド週末基礎講座の講演再録にも取りまとめられているので参照いただきたい[2]）。原子力機構で進めてきたこれらの研究開発やその他の既往研究による科学的知見に基づき、地殻変動が活発な日本においても地層処分に適した地質環境が広く存在し得るとの見通しが得られている[3]。

一方、2011年東北地方太平洋沖地震（いわゆる東日本大震災）とそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所事故以降、高レベル放射性廃棄物の処分の信頼性に対して根源的な疑問が投げかけられた[4]。これを受けて、総合資源エネ

ルギー調査会地層処分技術ワーキンググループでは、最新の科学的知見を反映した上で、地層処分の技術的信頼性の再評価がなされた。その結果、地層処分に好ましい地質環境およびその長期安定性が確保できる場所を日本においても選定可能であることが改めて確認されたが、同時に更なる信頼性向上に向けた複数の研究課題も提示された[5]。例えば、隆起量・侵食量の評価に反映するための、地形学的手法や堆積物の年代測定に基づく評価方法の整備や、断層の活動性の評価に反映するための、断層活動によって破砕された岩石や充填鉱物の年代測定方法の整備、地震活動の評価に反映するための、巨大地震後に誘発される地震や湧水に関する調査事例の蓄積が挙げられている。原子力機構ではこれらの課題を克服するため、地質環境の長期安定性に関する研究に引き続き取り組んでいるが、本稿ではこのうち、東北地方太平洋沖地震に伴う地下水流動系の変化に関する検討事例について紹介する。

2 地震・断層活動と地下水流動

地層処分の安全評価は10万年以上の時間スケールを対象としている。放射性廃棄物の核種移行は主に地下水が大きな役割を担うので、岩盤中の地下水流動を把握することが重要である。この場合、現在の地下水流動の把握のみならず、10万年以上の長い時間スケールにおける、地下水流動の変化の有無や傾向を高い信頼性で予測することが必要となる。

地震を引き起こす断層の多くは、断層面に沿って破壊されて粉々になった岩片や、割れ目が密に発達した岩石で構成される幅を持ったゾーン（破砕帯）を伴う。破砕帯は、しばしば割れ目に沿って地下水が流れる水みちとなり得る。一方で断層活動の繰り返しに伴う岩石・鉱物の細粒化や変質鉱物の形成は、割れ目などの空隙を塞ぐことになるため、破砕帯の中には遮水性のバリアとして機能する部分もある[6]。つまり、破砕帯は岩盤中の地下水流動の不均質性をもたらす大きな要因の一つであると言える。

地震に伴い、地下水の水圧（水位）・水温・水質などが変化する事例は、これまでに国内外で多数報告されている[7]。

Geosphere stability for long-term isolation of radioactive waste: Case study for hydrological change with earthquakes and faulting by Masakazu NIWA (niwa.masakazu@jaea.go.jp)

*1 日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

Tono Geoscience Center, Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management, Japan Atomic Energy Agency

〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会2015年度バックエンド週末基礎講座における講演内容の一部である。

地下水圧の変化としては主に、地震直後の振動 (oscillation) と、継続性の変化として認識されるステップ状の増減との 2 つのタイプがある。このうちステップ状の増減が生じる原因としては、1) 地表付近の未固結堆積物の液状化、2) 地殻の静的な体積歪の変化、3) 動的な応力変化が引き起こす局所的な透水性の変化、が挙げられている[7]。3) については、地震に伴い割れ目中の充填物質が移動する (つまりが取れる) ことなどにより局所的に透水性が上昇し、周辺の地下水応答が変化するというような考え方である[8]。このような透水性の変化は長期的な時間スケールで見たとときの地下水流動の変化にも影響しうるので、地層処分における安全評価でも考慮する必要が出てくる。

3 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地下水圧の変化

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、気象庁マグニチュードで 9.0 を示し、国内観測史上最大規模のプレート境界型地震である。この地震の発生以降、これに誘発されたと考えられる地震が各地で発生しているほか、これらに伴った地下水や温泉水の水位・水質の変化も各地で報告されている[9,10]。

原子力機構瑞浪超深地層研究所 (以下、研究所) およびその周辺では、地層処分にとって重要な地下深部の地下水流動を調査・評価する手法の開発のため、複数のボーリング孔で過去 10 年以上にわたり地下水観測を行っており、現在も継続中である。このうち地下水圧は、被圧地下水を対

象に、ボーリング孔内のパッカーで区切った複数の区間で観測を行っている。観測間隔は 5 分ないし 30 分を基本としている。東北地方太平洋沖地震の際は、地下深部の花崗岩中の観測区間ではすべてにおいて、地下水圧の急激な変化が観測された[11]。地震直後の変動を見ると、研究所用地内とその近傍では地下水圧の上昇が観測されたが、それ以外ではすべての観測地点で地下水圧が急激に低下している (図 1(a)および図 2)。

まず、上述の 2) 地殻の静的な体積歪の変化の影響を検証するため、食い違い理論に基づく数値シミュレーションにより、地震に伴う岩盤の体積歪変化を推定した。東北地方太平洋沖地震を引き起こした断層モデル(すべり量分布)については、地震波形や GPS、津波データからのインバージョン解析によって複数の研究者によって示されている。これらの断層モデルを用いて、地殻変動解析プログラム Coulomb3.1[12]により地震に伴う体積歪変化を計算した (図 1(b))。その結果、東北日本～中部日本のほぼ全域において地殻の膨張域であることが明らかとなった。これは、東北日本各地で地盤の沈下や東方への水平変位が GPS にて観測されている事実[13]と整合的である。研究所周辺では、約 2×10^{-7} strain の体積歪膨張を示す。

一方、水圧変化に対する歪応答感度は、地下水圧の潮汐成分から計算することができる。本研究では、地下水圧変動のうち地球潮汐の影響によるものをベイズ法による解析から抽出することができるプログラム BAYTAP-G[14]を用いた。水圧変化の観測にとって大きなノイズとなり得る要

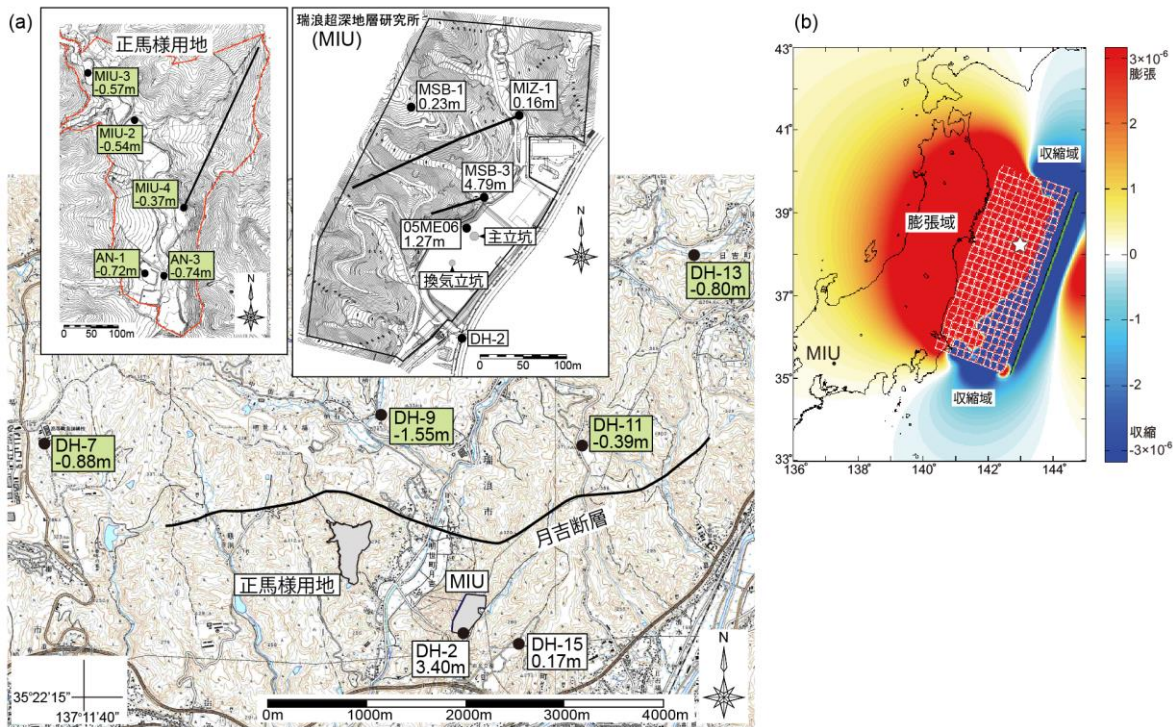


図 1 (a) 地下水観測を実施しているボーリング孔の位置と、東北地方太平洋沖地震の前後 1 日での地下水圧変化 (最も変化の大きかった観測区間の値)。瑞浪超深地層研究所 (MIU) 用地内と研究所から 500m 以内に位置する DH-2, 15 では水圧上昇を示すが、他の地点はすべて水圧低下を示す。(b) Coulomb3.1 による体積歪の計算結果。計算深度は 1 km とした。星印が東北地方太平洋沖地震の震源で、断層モデルは Yagi and Fukahata (2011) [15]を採用した。

原地層処分と地質環境の長期安定性：
地震・断層活動に伴う地下水流動系の変化に関する検討事例

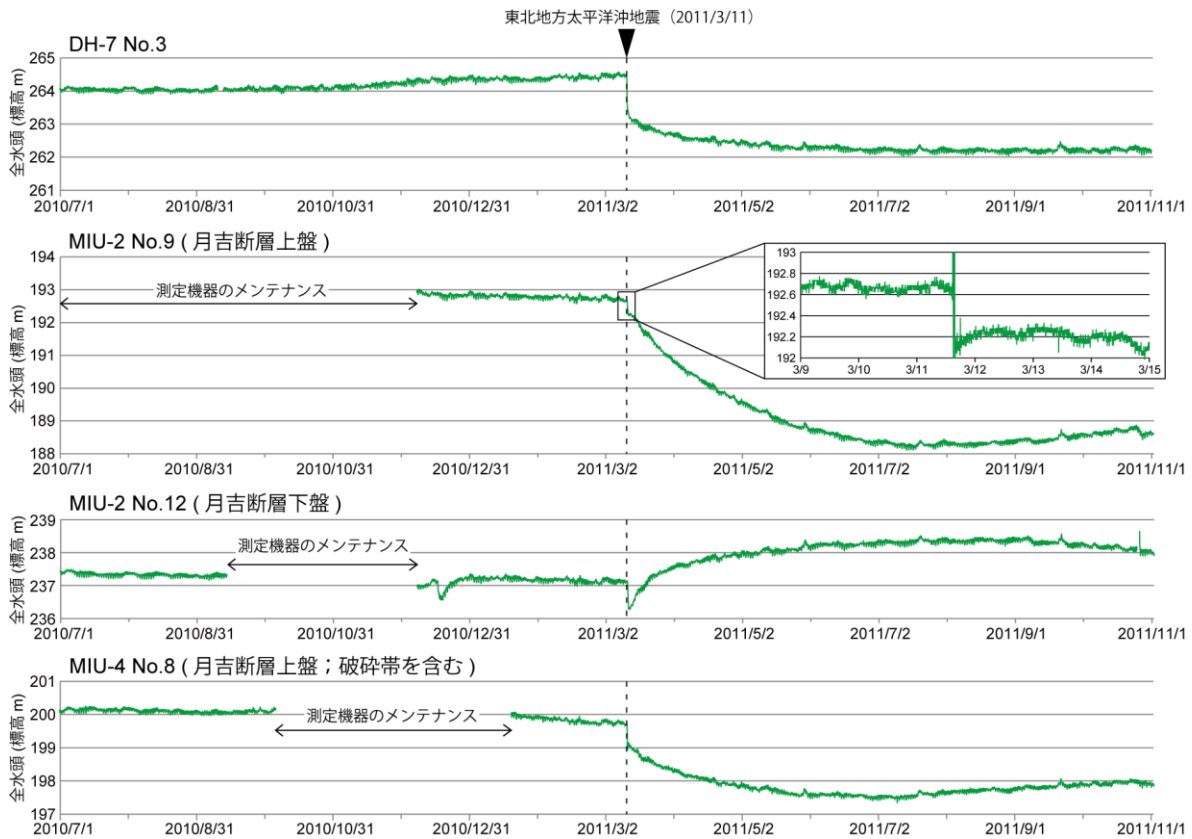


図 2 東北地方太平洋沖地震の前後数か月間での地下水圧変化（全水頭に換算）。MIU-2 No.9 号孔については地震前後数日間の地下水圧変化を拡大表示。地震発生時に水圧値が大きく振れるのは、地震動による直接的な振動（oscillation）のため。MIU-2 No.9 号孔では、地震前後 1 日での水圧低下量は約 50cm であることがわかる。

素（激しい降雨、センサーのトラブル、坑道掘削など）がない時期および観測地点・区間を選定し、BAYTAP-G によって地下水圧の潮汐成分を計算するとともに、当該時期の地球潮汐の理論値を GOTIC2[16]によって求めることにより、研究地域の被圧地下水の水圧変化に対する歪応答感度を推定することができる。推定した歪応答感度からは、東北地方太平洋沖地震に伴う体積歪膨張は、数 10 cm オーダーの地下水圧低下に相当する[11]。これは、地震前後 1 日の水圧低下量（図 1(a)）とおおむね同じであり、地震直後の急激な水圧低下は、2) 地殻の静的な体積歪の変化によって説明できることになる。このような関係は、東北地方太平洋沖地震以外の他の地震（例えば、2004 年の紀伊半島南東沖地震）に伴う地下水圧変化でも説明される。一方、研究所用地内とその近傍では、坑道掘削による排水に伴い平衡水位が継続的に低下していることから、地震に伴う地殻の膨張により移動した地下水が坑道やその周辺に流入し、地下水圧が見かけ上昇する結果となった可能性がある[11]。

4 地下水圧の長期的な変化と断層の透水性との関係

東北地方太平洋沖地震後の長期（数か月ないしそれ以上）の地下水圧観測データを見ると、研究地域に分布する月吉断層の上盤と下盤とは異なる傾向を示し、上盤では数か月間水圧低下を続けるのに対し、下盤では地震直後の水圧

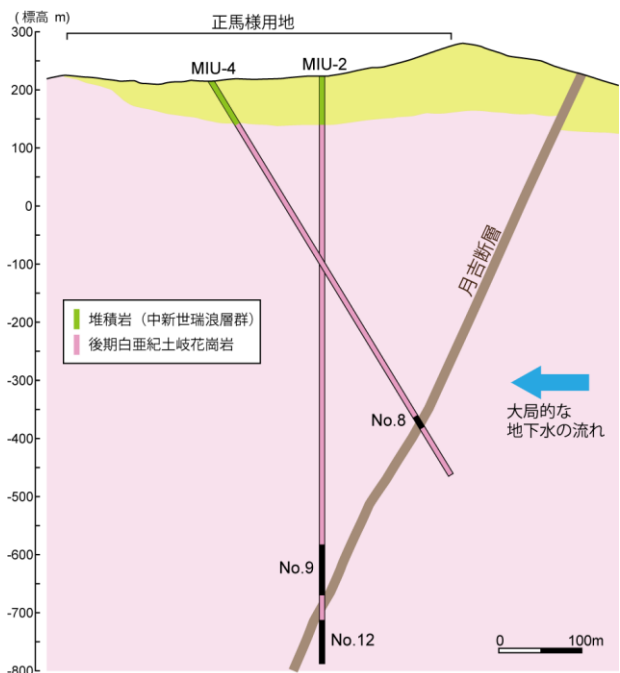


図 3 正馬様用地におけるボーリング孔と月吉断層との関係を示した断面図。正馬様用地の位置は図 1(a) 参照。

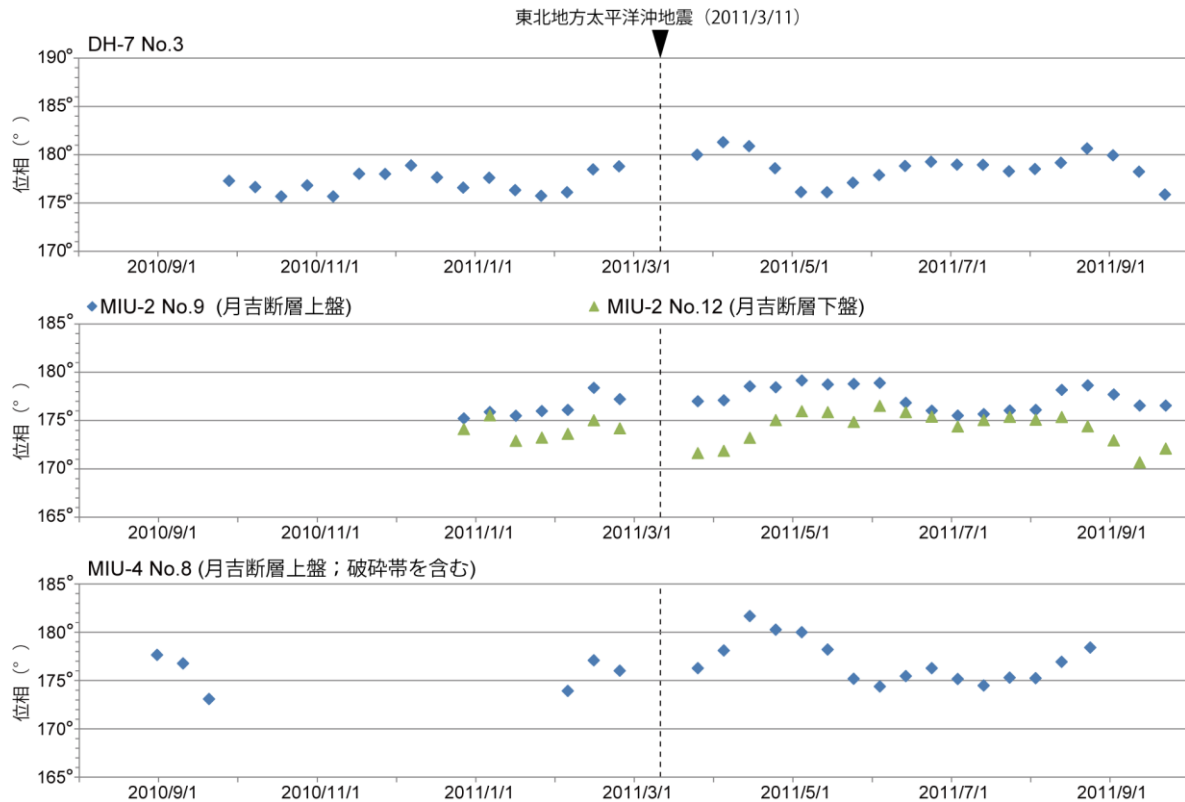


図4 東北地方太平洋沖地震の前後数か月間における全水頭のM2分潮成分の位相変化。

低下後は逆に上昇に転じ、地震前よりも水圧が高くなる(図2および3)。実際に近年地震を起こした活断層を貫くボーリング孔での観測では(例えば、2008年中国四川省Wenchuan地震を引き起こしたLongmenshan断層での事例)、地震に伴い断層破碎帯で透水性が変化することが指摘されている[17]。月吉断層は活断層ではないものの、断層を挟んで水圧変化の傾向が異なることから、地震に伴う透水性の変化を検証するための解析を行った。

地球潮汐に対する水圧応答(位相と振幅)は、岩盤の透水性や貯留性とも密接に関連しており、透水性が低いほど水圧応答の位相に遅れが生じる[18]。そこで、前述のBAYTAP-Gを用いて、東北地方太平洋沖地震の前後の地下水圧の潮汐成分の位相の変化を計算した。

本研究では地球潮汐の中で振幅が最も大きく、周期が約半日のM2分潮に着目した。半日程度の周期をもつ成分の抽出においては、元データのサンプリング間隔は1時間程度が妥当であるとされている[19]。そこで、地下水圧を全水頭に換算したデータを、前後2時間分の観測データの平均値として1時間間隔の観測値とした。主要な分潮を分離するためには最低1か月程度の観測期間が必要であるため[19]、1時間間隔の全水頭換算値を708時間分(29.5日分)を1セットとし、BAYTAP-Gで計算してM2分潮成分の位相を求めた。この1セットの最初の観測値は10日おきの午前0時のものになるように設定し、前後のセット間で19.5日分の観測値を重複させるようにした。ただし、東北地方太平洋沖地震の発生時刻前後(2011年3月11日午後13時~14時)をまたがらないように1セットを設定してい

る。

以上のようにしてM2分潮成分の位相の時間変化を調べたところ、どの観測区間においても、東北地方太平洋沖地震の前後において、位相にステップ状の急激な変化は認められなかった(図4)。つまり、月吉断層に関しては、地震後数か月以上に及ぶ長期的な地下水圧の変化の要因として、岩盤の透水性の変化はほとんど関与していないことを示唆する。

複数のボーリング孔間の全水頭の差から推定される動水勾配(見かけの動水勾配)に基づく、正馬様用地周辺における地下水の流れは北から南、すなわち月吉断層の下盤から上盤に流れる方向となる[20]。また、月吉断層の破碎帯の主部は緻密な岩石組織を有しており[21]、遮水性のバリアとなっていることが推定される。したがって、東北地方太平洋沖地震に伴う体積歪の変化により岩盤全体で地下水圧が低下した後、従来から存在する透水構造の不均質性により、月吉断層の上盤と下盤とで、地下水圧の回復傾向が異なる結果となったと考えられる。

5 まとめ

本研究における地下水圧観測データを用いた解析からは、東北地方太平洋沖地震に伴い地下水圧は変化するものの、周辺岩盤や断層の透水性は地震によって不可逆的に変化したわけではないことを明らかにした。本研究の結果は、東北地方太平洋沖地震のような規模の大きな地震の場合でも、震源から十分に離れていれば、断層を含む地下の岩盤の透

水性に長期的な変化を及ぼすことはないことを示す。ただし、被圧地下水の長期連続観測およびそれらのデータを解析した研究事例は世界的に見ても未だ十分とは言えない。地震に伴う透水性の変化が起こる条件（巨大地震を引き起こす震源域からどれだけ離れていれば岩盤の透水性の長期的な変化を考慮する必要がないかの閾値といった点）については、さらに国内外の観測事例を整理して検討していく必要がある。この点において、原子力機構における地質環境の長期安定性に関する研究は、今後も引き続き大きな貢献ができるものと考えている。

参考文献

- [1] 草野友宏・浅森浩一・黒澤英樹・國分(齋藤)陽子・谷川晋一・根木健之・花室孝広・安江健一・山崎誠子・山田国見・石丸恒存・梅田浩司：「地質環境の長期安定性に関する研究」第1期中期計画期間（平成17年度～平成21年度）報告書（H22レポート）。JAEA-Research 2010-044 (2011).
- [2] 梅田浩司・安江健一・石丸恒存：バックエンド週末基礎講座 地層処分と地質環境の長期安定性：地質環境の長期予測と不確実性についての検討例。原子力バックエンド研究 第21巻 第1号, pp.43-47 (2013).
- [3] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論。JNC TN1400 99-020 (1999).
- [4] 日本学術会議：回答高レベル放射性廃棄物の処分について (2012).
- [5] 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術WG：最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について— (2014).
- [6] Caine, J.S., Evans, J.P., and Forster, C.B. : Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, pp. 1025-1028 (1996).
- [7] Wang, C.-Y., and Manga, M. : *Earthquakes and Water. Lectuer Notes Earth Science*, 114, Springer, Berlin (2010)
- [8] Elkhoury, J.E., Brodsky, E.E., and Agnew, D.C. : Seismic waves increase permeability. *Nature*, 441, pp.1135-1138 (2006).
- [9] 北川有一・小泉尚嗣：東北地方太平洋沖地震（M9.0）後1日間での地下水位・地下水圧・自噴量変化。活断層・古地震研究報告 第11号, pp.319-318 (2011)
- [10] 大塚晃弘・高橋孝行・益子保：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴ういくつかの温泉の変化。温泉科学 第61巻 第4号, pp.286-291 (2012).
- [11] Niwa, M., Takeuchi, R., Onoe, H., Tsuyuguchi, K., Asamori, K., Umeda, K., and Sugihara, K. : Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13(5), Q05020 (2012).
- [12] Toda, S., Stein, R.S., Richards-Dinger, K., and Bozkurt, S. : Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research*, 110, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415 (2005).
- [13] Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., and Imakiire, T. : Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, 475, 373-376 (2011).
- [14] Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M., and Ishiguro, M. : A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. *Geophysical Journal International*, 104, pp.507-516 (1991).
- [15] Yagi, Y., and Fukahata, Y. : Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release. *Geophysical Research Letters*, 38, L19307, doi:10.1029/2011GL048701 (2011).
- [16] Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T., and Ooe, M. : GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect. *Journal of Geodetic Society of Japan*, 47, pp.243-248 (2001).
- [17] Xue, L., Li, H-B., Brodsky, E.E., Xu, Z-Q., Kano, Y., Wang, H., Mori, J.J., Si, J-L., Pei, J-L., Zhang, W., Yang, G., Sun, Z-M., and Huang, Y. : Continuous permeability measurements record healing inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone. *Science*, 28, pp.1555-1559 (2013).
- [18] Hsieh, P.A., Bredehoeft, J.D., and Farr, J.M. : Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis. *Water Resources Research*, 23(10), pp.1824-1832 (1987).
- [19] 田村良明：地球潮汐データの解析。赤池弘次・北川源一郎編，時系列解析の実際II，朝倉書店，pp.151-165 (1985).
- [20] 竹内竜史・露口耕治・尾上博則・三枝博光・別府伸治：地震に伴う地下水圧の変化が地下水流動特性に与える影響—東濃地域における事例—。原子力バックエンド研究 第22巻 第2号, pp.37-52 (2015).
- [21] Onishi, C.T., and Shimizu, I. : Microcrack networks in granite affected by a fault zone: Visualization by confocal laser scanning microscopy. *Journal of Structural Geology*, 27, 2268-2280 (2005).

